

# Analiza przebiegu zjawisk elektrycznych podczas rozruchu silnika spalinowego autobusu miejskiego

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę rozruchu spalinowego silnika autobusu miejskiego w warunkach zmniejszającego się stopnia naładowania akumulatora rozruchowego. Obiektem badań był autobus miejski Solaris Urbino 12 wyposażony w silnik wysokoprężny Cummins o pojemności 6,7 dm<sup>3</sup>. Określono wpływ zmniejszającego się napięcia akumulatorowego na przebieg rozruchu.

**Abstract.** This paper presents an analysis of voltage and current characteristics of the battery during the start of the city bus internal combustion engine. The city bus Solaris Urbino 12 equipped with a diesel engine was tested. The battery's electrical parameters at different voltages were monitored during starting the engine. The influence of the decreasing start-up voltage on the battery parameters was determined and as a consequence leads to the reduction of the batteries life. In addition, the influence of voltage values on the start-up time and the influence on the value of the inrush current was presented. (**Analysis of electric phenomena during the start of a city bus internal combustion engine**).

**Słowa kluczowe:** autobus miejski, instalacja elektryczna, silnik spalinowy, rozruch.

**Keywords:** city bus, electrical wiring, internal combustion engine, starting.

## Wstęp

Tendencje zmian w transporcie miejskim prowadzą do stopniowego zastąpienia indywidualnych pojazdów samochodowych pojazdami publicznymi, zwłaszcza autobusami. Wciąż ponad 95% nowych autobusów stanowią pojazdy wyposażone w napędy spalinowe. W dodatku silniki spalinowe nadal posiadają duży potencjał do znacznych ulepszeń, szczególnie w odniesieniu do zmniejszenia zużycia paliwa i emisji szkodliwych składników spalin [1]. Nowe elektroniczne systemy autobusowe są montowane ze względu na potrzeby zmniejszenia zużycia paliwa i ekologii jak również nowych funkcji poprawy bezpieczeństwa i komfortu jazdy czy też niezawodności pojazdu. Elektronicznie sterowane i zasilane układy do hamowania, sterowania i stabilizacji toru jazdy potrzebują niezawodnego dostarczania energii elektrycznej [2].

Tymczasem, w odniesieniu do autobusów miejskich, istnieje dość dokuczliwy problem rozładowywania się akumulatorów eksploatowanych w warunkach dużego poboru prądu, podczas postoju autobusu na przystanku końcowym. Część systemów informacji pasażerskiej oraz nawigacyjnych musi być włączona pomimo braku ładowania akumulatora przez alternatory w nieruchomym silniku. Silnik spalinowy ze względów ekologicznych i ekonomicznych musi być wyłączony w nieruchomym autobusie. Taka sytuacja wywołuje rozładowanie akumulatora, który po wznowieniu działania silnika jest ponownie ładowany. Ciągłe ładowanie i rozładowywanie akumulatorów autobusowych powoduje tendencję do ich degradacji, zmniejszając im czas użytkowania [3]. Połączona mechaniczno-chemiczna degradacja elektrod podczas ładowania i rozładowania została uznana za główny mechanizm awaryjny w akumulatorach chemicznych [4]. Monitorowanie stanu technicznego akumulatora i zarządzanie energią elektryczną autobusu miejskiego stają się jeszcze bardziej ważne wskutek rozwoju liczby oraz mocy elektrycznych odbiorników pokładowych [5]. W szczególności dotyczy to funkcji rozruchu silnika, zwłaszcza wskutek dużych problemów logistycznych przewoźnika miejskiego w sytuacji, gdy próba rozruchu kończy się niepowodzeniem.

Zrozumienie i zdolność przewidywania zachowań akumulatora rozruchowego jest jednym z podstawowych celów producentów samochodów ze względu na bezpieczeństwo, komfort, oszczędność paliwa, itp. [6]. Urządzeniem odpowiedzialnym za prawidłowy rozruch

silnika jest rozrusznik prądu stałego, stanowiący integralną część silnika samochodowego [7]. Zadaniem rozrusznika jest dokonanie rozruchu, a także wytworzenie momentu elektromagnetycznego wystarczającego do uzyskania odpowiedniej prędkości obrotowej umożliwiającej regularny samozapłon w silniku diesla. Rozrusznik elektryczny silnika spalinowego jest złożonym obiektem technicznym, od sprawności którego zależy gotowość eksploatacyjna pojazdu mechanicznego [8]. Badania systemów rozruchowych są konieczne w celu teoretycznego opisu zjawisk dynamicznych występujących podczas operacji rozruchu [9].

Niniejsza praca jest próbą eksperymentalnego określenia przebiegu procesu rozruchu silnika autobusowego w warunkach pogarszającego się stanu naładowania akumulatora rozruchowego.

## Opis procedury badawczej

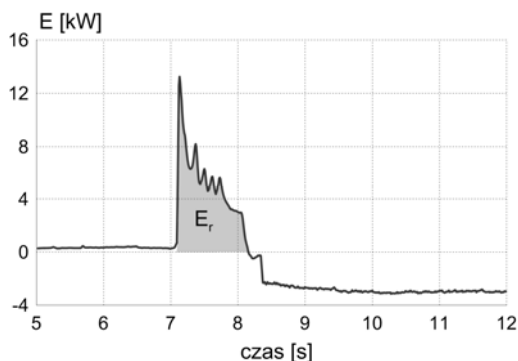
Badania przeprowadzono na autobusie miejskim Solaris Urbino 12, wyposażonym w wysokoprężny silnik Cummins o pojemności 6,7 dm<sup>3</sup>. W autobusie zamontowane były 3 alternatory firmy Bosch, każdy o natężeniu prądu 120 A oraz rozrusznik o mocy 5,6 kW. Kolejne próby rozruchu przeprowadzono co 5, minut każdorazowo rozładowując akumulator rozruchowy poprzez włączenie do instalacji elektrycznej odbiornika o mocy 2,4 kW (zestawu żarówek żarnikowych). Pogarszający się stan naładowania akumulatora wywoływał zmiany w czasowym przebiegu rejestrowanych wielkości pomiarowych. Podczas badań rejestrowano prąd i napięcie akumulatora oraz prędkość obrotową silnika spalinowego (dzięki odczytowi ze złącza autobusowego CAN). System gromadzenia, analizy i archiwizacji danych obejmował:

- sterownik czasu rzeczywistego NI CompactRIO-9024,
- moduł interfejsu CAN NI 9862,
- moduł kart akwizycji danych NI CompactRIO-9118,
- kartę do akwizycji danych.

Częstotliwość zapisu danych wynosiła 100 Hz. W ten sposób zarejestrowano przebiegi sygnałów pomiarowych dla kolejnych 13 prób rozruchu. Po udanym rozruchu silnik pracował jedynie przez 30 sekund tak, aby umożliwić rejestrację procesu ładowania akumulatora przez pokładowe alternatory. Właśnie intensywność porozruchowego procesu ładowania akumulatora wraz z intensywnością rozruchowego rozładowania są uważane za przyczyny szybkiej degeneracji stanu technicznego akumulatorów autobusowych.

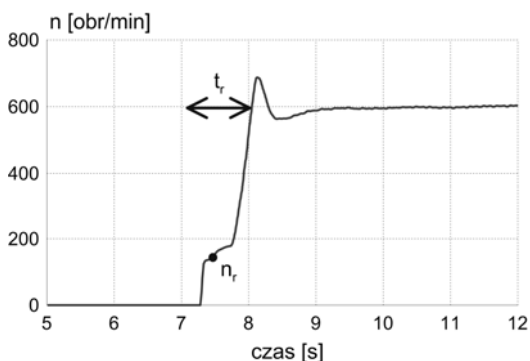
## Wyniki badań

Na rysunkach 1-4 pokazano przykładowe przebiegi zarejestrowanych wielkości wraz ze schematami wyznaczania parametrów rozruchowych. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg obliczonej mocy prądu płynącego z akumulatora podczas procesu rozruchu oraz zilustrowano sposób obliczania energii  $E_r$  przekazanej z akumulatora. Warto zauważyć, że energia elektryczna przekazywana przez akumulator jest zużywana nie tylko na napęd rozrusznika ale również na zasilanie pokładowych urządzeń autobusowych aktywnych podczas rozruchu. Rysunek pozwala na spostrzeżenie oscylacyjnego charakteru mocy elektrycznej pobieranej przez rozrusznik. Przyczyną oscylacji jest nierównomierność prędkości obrotowej silnika będącej cechą związaną z działaniem układów korbowlotkowych poszczególnych cylindrów. Ponadto widoczna jest duża wartość mocy elektrycznej pobieranej z akumulatora na początku rozruchu, wynikająca z zasady działania indukcyjnej maszyny elektrycznej (rozrusznika). Wreszcie, ostatnia część przebiegu pokazuje proces ładowania akumulatora przez zestaw alternatorów prądem o mocy ponad 3 kW.



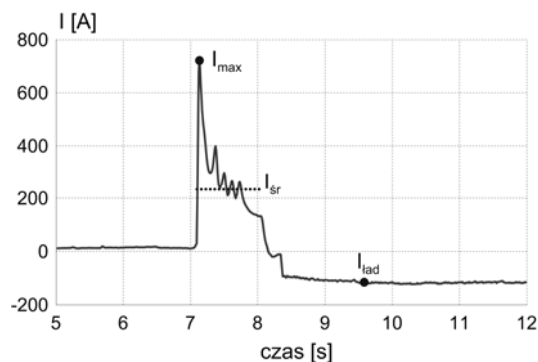
Rys. 1. Schemat wyznaczania energii  $E_r$  pobranej z akumulatora podczas trwania rozruchu

Rysunek 2 przedstawia czasowy przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Na rysunku zaznaczono punkt charakterystycznej prędkości obrotowej rozrusznika  $n_r$  przed podjęciem pracy przez silnik. Należy zauważyć, że prędkość obrotowa silnika przekazywana jest przez pokładową transmisję CAN z opóźnieniem w sytuacji małej prędkości, zanim sterownik silnika upewni się, że sygnały z czujnika prędkości obrotowej nie są zakłóceniami. Rysunek zawiera schemat wyznaczania czasu rozruchu  $t_r$ , który na potrzeby niniejszej pracy przyjęto jako czas od początku poboru prądu przez rozrusznik do uzyskania przez silnika prędkości biegu jałowego, co w przypadku badanego silnika wynosi 600 obr/min.



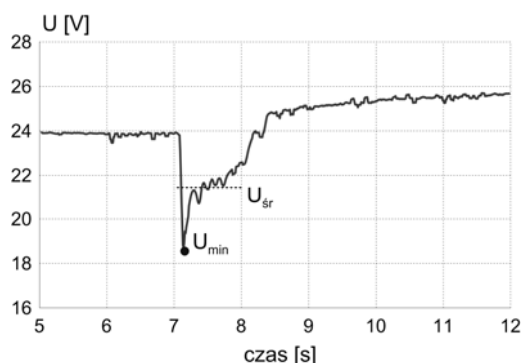
Rys. 2. Schemat wyznaczania czasu trwania rozruchu  $t_r$  oraz prędkości obrotowej rozrusznika  $n_r$

Rysunek 3 pokazuje przebieg czasowy prądu elektrycznego pobieranego z akumulatora. Zaznaczono wartość maksymalną  $I_{max}$  oraz średnią  $I_{sr}$  dla okresu, w którym prąd rozrusznika jest dodatni. Równocześnie zaznaczono schematycznie wartość prądu ładowania  $I_{lad}$  w okresie porozruchowym.



Rys. 3. Schemat wyznaczania parametrów prądu akumulatora podczas trwania rozruchu

Ostatni w tej części rysunek 4 pokazuje przebieg czasowy napięcia akumulatora podczas rozruchu. Zaznaczono wartość minimalną  $U_{min}$  oraz średnią  $U_{sr}$  dla okresu, w którym prąd rozrusznika jest dodatni.

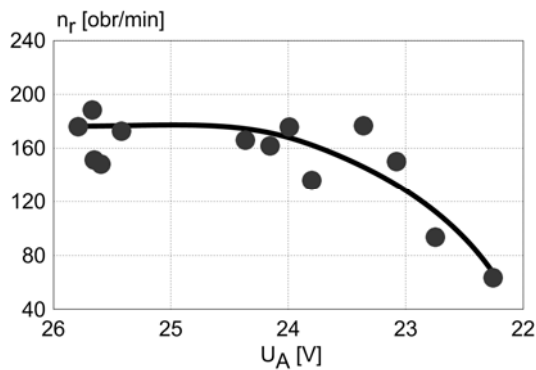


Rys. 4. Schemat wyznaczania parametrów napięcia akumulatora podczas trwania rozruchu

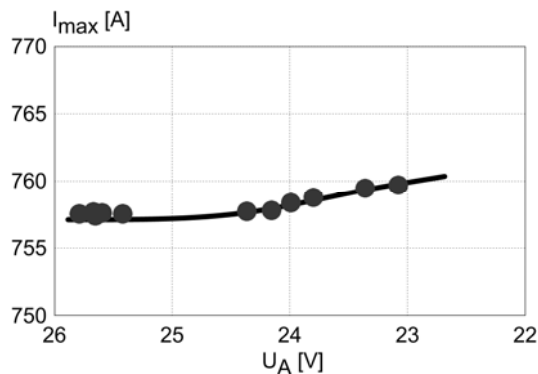
## Analiza wyników badań

Wszystkie charakterystyki analityczne przedstawiają zależność parametrów rozruchu od wartości napięcia startowego akumulatora  $U_A$  tuż przed rozruchem. Koniecznie należy zauważyć, że mierzona wartość napięcia przed uruchomieniem autobusu (po przekręceniu kluczyka w stacyjce do pozycji ON) jest największa a potem stopniowo zmniejsza się wskutek poboru prądu przez aktywne urządzenia pokładowe. W chwili przekręcenia kluczyka do pozycji START wartość napięcia akumulatora jest zauważalnie mniejsza. Do dalszych analiz używano zatem wartości napięcia akumulatora tuż przed rozruchem.

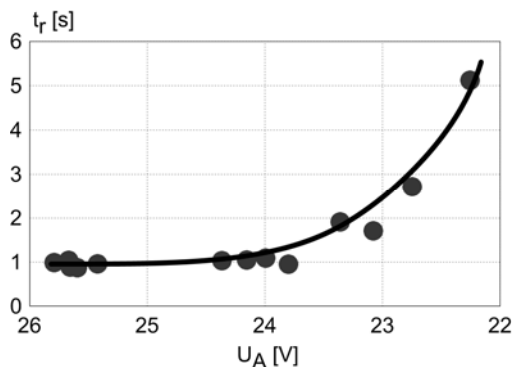
Pierwszy wykres analityczny (wykres 5) pokazuje zależność prędkości obrotowej rozrusznika  $n_r$  od napięcia akumulatora  $U_A$ . Degradujący wpływ zmniejszającego się napięcia powoduje dwukrotny spadek prędkości obracania się rozrusznika W efekcie zbyt duży czas trwania cyklu roboczego silnika skutkuje dużą stratą ciepła powietrza w cylindrze i brakiem wystarczających warunków cieplnych do samozapłonu. Proces rozruchu wydłuża się aż do uzyskania przez części silnikowe wystarczająco dużej temperatury. Czas rozruchu  $t_r$  zwiększa się nawet kilkakrotnie, co pokazuje rysunek 6.



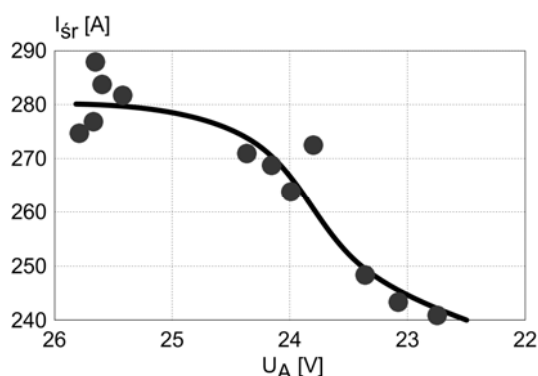
Rys. 5. Wpływ napięcia akumulatora  $U_A$  na prędkość obrotową rozrusznika  $n_r$



Rys. 8. Wpływ napięcia akumulatora  $U_A$  na maksymalną wartość prądu  $I_{max}$  pobieranego z akumulatora podczas rozruchu

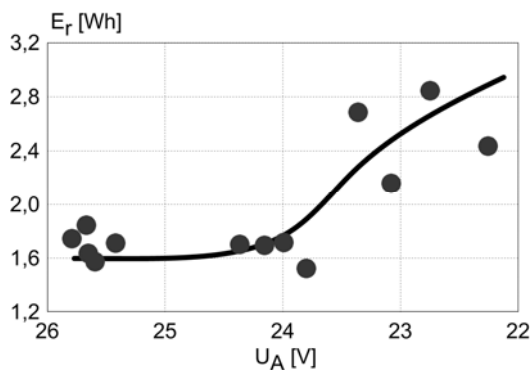


Rys. 6. Wpływ napięcia akumulatora  $U_A$  na czas  $t_r$  osiągnięcia przez silnik prędkości obrotowej 600 obr/min



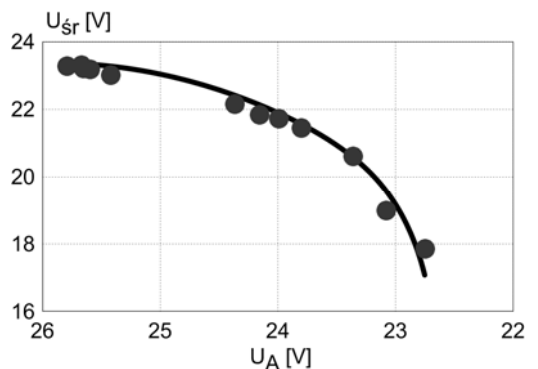
Rys. 9. Wpływ napięcia akumulatora  $U_A$  na średnią wartość prądu  $I_{sr}$  pobieranego z akumulatora podczas rozruchu

Wydłużający się czas trwania rozruchu pociąga za sobą zwiększenie energii dostarczanej do rozrusznika przez akumulator. Jak pokazuje rysunek 7 ilość energii przekazywanej podczas rozruchu wynosi około 1,6 – 1,8 Wh w warunkach naładowanego akumulatora i osiąga wartość około 3 Wh dla rozładowanego akumulatora.

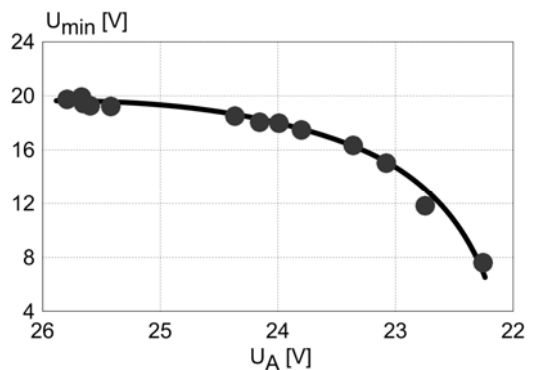


Rys. 7. Wpływ napięcia akumulatora  $U_A$  na energię  $E_r$  pobraną z akumulatora podczas rozruchu

Stosunkowo najmniejszy wpływ wywiera zmniejszające się napięcie akumulatora na prąd rozruchu, co związane jest z zapotrzebowaniem energetycznym rozrusznika. Rysunki 8 i 9 pokazują, że maksymalny prąd rozruchowy zmienia się zaledwie o około 4%, zaś średni prąd rozruchu o około 15%. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wpływ początkowego napięcia akumulatora  $U_A$  na średnią wartość napięcia  $U_{sr}$  oraz minimalną wartość napięcia  $U_{sr}$  akumulatora podczas trwania rozruchu. W obu przypadkach następuje degradacja wartości napięcia, zwiększająca swoje tempo wraz ze zmniejszaniem się stanu naładowania akumulatora.



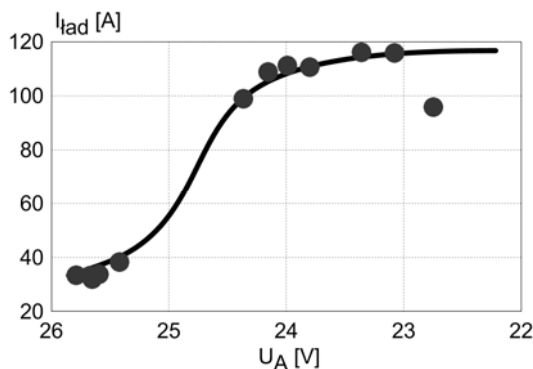
Rys. 10. Wpływ początkowego napięcia akumulatora  $U_A$  na średnią wartość napięcia  $U_{sr}$  akumulatora podczas trwania rozruchu



Rys. 11. Wpływ początkowego napięcia akumulatora  $U_A$  na minimalną wartość napięcia  $U_{sr}$  akumulatora podczas rozruchu

Ostatni wykres analityczny przedstawia zależność średniego prądu ładowania  $I_{lad}$  od napięcia akumulatora.

Oczywiście, zwiększający się stopień rozładowania akumulatora skutkuje bardziej intensywnym ładowaniem wskutek rosnącej różnicy potencjałów pomiędzy napięciem akumulatora a wartością ustawioną przez regulatory napięcia alternatorów.



Rys. 12. Wpływ początkowego napięcia akumulatora  $U_A$  na wartość prądu ładowania akumulatora  $I_{\text{ład}}$  podczas okresu po rozruchu

### Wnioski

Zmniejszające się napięcie rozładowującego się akumulatora rozruchowego prowadzi do pogarszania się funkcji rozruchu. Początkowo, dla małych spadków napięcia akumulatora w stosunku do stanu w pełni naładowanego, zmiany w mechanicznie skojarzonych parametrach rozruchu (prędkość obrotowa rozrusznika, czas osiągnięcia prędkości biegu jałowego) są niewielkie, charakterystyki zależności parametrów rozruchu od startowego napięcia akumulatora są dość płaskie. Zwiększona dynamika charakterystyk rozrusznika zwykle zaczyna się dla wartości napięcia poniżej 24 V i pogłębia się z każdym kolejnym punktem pomiarowym. Podobnie reagują procesy chemiczne w akumulatorze, demonstrując coraz większy spadek wartości napięcia wraz ze zmniejszającym się stanem naładowania akumulatora. Najmniej zależne od napięcia akumulatora są charakterystyki prądu płynącego z akumulatora do rozrusznika, maksymalna wartość prądu rozruchu wręcz zmienia się zaledwie o kilka procent. Istotne

zmiany zauważono natomiast na charakterystyce energii rozruchu oraz wartości prądu porozruchowego.

Przeprowadzone badania są wstępem do prac autora nad poprawą stanu techniki rozruchu w autobusach miejskich, w tym nad dostarczeniem do rozrusznika uzupełniającej energii elektrycznej od urządzeń nie będących akumulatorami rozruchowymi.

**Autor:** dr inż. Mariusz Duk, Politechnika Lubelska.

### LITERATURA

- [1] Guzzella L., Onder C., Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems, *Springer Berlin Heidelberg*; (2010)
- [2] Meissner E., Richter G., Battery Monitoring and Electrical Energy Management Precondition for future vehicle electric power systems, *Journal of Power Sources*, Volume 116 (2003), 79-98
- [3] Gross G., Landi M., Measurement of a health index for Li-Ion batteries, 2013 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, IEEE, (2013), 177-182
- [4] Deshpande R., Verbrugge M., Cheng Y-T., Wang J., Liu P., Battery Cycle Life Prediction with Coupled Chemical Degradation and Fatigue Mechanics. *J. Electrochem. Soc.* 159(10), (2012), 1730-1738
- [5] Thyagarajan A., Raja Prabu R., Uma G., Battery Monitoring and Power Management for Automotive Systems, *American Journal of Energy Research*, 2.1 (2014), 1-8
- [6] Gallego F., Bigorra J., Seguer M., Sánchez F., Samitier J., In-Vehicle and Lab Tests of State-of-Power Monitoring System for Automotive Batteries. *SAE Technical Paper 2001-01-3344*, (2001)
- [7] Dziubiński M., Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu, *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin, (2016), 1-149
- [8] Plizga K., Model symulacyjny sygnału diagnostycznego, *Motoryzacja i energetyka rolnictwa, Motrol*, nr 10B (2008), Lublin, 207-219
- [9] Azzouaz G., Lundberg L., Modeling And Simulation Of An Automotive Diesel Engine Cranking System, Göteborg, *Chalmers tekniska högskola, Praca Magisterska*, 2005, 1-82